

喀斯特石漠化过程中小生境及岩性的演替对土壤有机碳的影响

王兴富¹，黄先飞²，胡继伟¹，张珍明³

(1.贵州师范大学喀斯特研究院,贵阳 550001;
2.贵州师范大学贵州省山地环境信息系统与生态环境保护重点实验室,贵阳 550001;3.贵州科学院生物研究所,贵阳 550001)

摘要：为探讨喀斯特石漠化过程中地表小生境及成土母质岩性的演变对土壤有机碳的影响,以不同喀斯特地貌类型的角度出发,分别从贵州普定、兴义、关岭、荔波及印江县选取对应的喀斯特高原(KG)、峰丛洼地(KF)、峡谷(KX)、原始森林(KY)及槽谷(KC)作为研究区域,分析了 0—40 cm 土壤层(0—10,10—20,20—30,30—40 cm)及土壤与基岩交界面土层的有机碳含量,分别计算土壤有机碳密度及储量,并分析其空间分布特征及演变规律。结果表明:不同石漠化等级下土壤有机碳含量、密度及储量分别为 113.18~163.98 g/kg,1.08~7.32 kg/m² 及 4.07~24.29 kg,并且呈现出随着石漠化程度的增加而逐渐降低的趋势,同时小生境为石槽以及成土母质岩性为石灰岩及泥灰岩的土壤有机碳含量相对较高。不同喀斯特地貌类型之间土壤有机碳存在较大的差异,在同等的条件下 KY 及 KC 土壤有机碳储量相对要高于其他地貌类型。土壤有机碳在喀斯特石漠化演变链上迁移,而小生境及成土岩性的更迭对不同喀斯特地貌类型土壤有机碳在重构空间分布格局具有重要的指示意义。同时喀斯特岩溶地区生态环境复杂多变,要获得评估喀斯特地区土壤有机碳更灵敏的方法,仍需开展进一步研究。

关键词：不同喀斯特地貌；石漠化；土壤容重；小生境；岩性；土壤有机碳；演替机制

中图分类号：S156.1；X144 **文献标识码：**A **文章编号：**1009-2242(2020)04-0295-09

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.04.043

Relationship Among Soil Organic Carbon and Small Environment and Lithology in the Rocky Desertification Process in Different Karst Landforms

WANG Xingfu¹, HUANG Xianfei², HU Jiwei¹, ZHANG Zhenming³

(1.School of Karst Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001; 2.Guizhou Provincial Key Laboratory Information System of Mountainous Areas and Protection of Environment, Guizhou Normal University, Guiyang 550001; 3.Institute of Biology, Guizhou Academy of Sciences, Guiyang 550001)

Abstract: In order to investigate the relationship among soil organic carbon and small environment and lithology in different karst landforms that the Karst plateau (KG), Karts peak-cluster depression (KF), Karst canyon (KX), Karst virgin forests (KY) and Karst trough valley (KC) were taken from Puding, Xingyi, Guanling, Libo and Yinjiang in Guizhou province, respectively. The content of soil organic carbon in soil horizons (0—10, 10—20, 20—30 and 30—40 cm) and organic carbon in the critical surface between bottom soil layer and bedrock were was tested by the method of potassium dichromate, and then counting out the density and storage of Soil organic carbon, the spatial distribution characteristics of soil organic carbon in different karst landforms was analyzed. The results showed that the content, density and storage of soil organic carbon in different rocky desertification class were 113.18~163.98 g/kg, 1.08~7.32 kg/m³ and 4.07~24.29 kg, respectively. The soil organic carbon is gradually reduce with the increasing of kasrt rocky desertification degree, and then the soil organic carbon concentration in stone trough is higher than other small environment types, and the content of soil organic carbon in the soil above on Limestone and Marl are more than other Lithology types as well. There is a large discrepancy of soil organic carbon among different karst landforms, in same ecology environment the soil organic carbon storage in KY and KC are more than other landform

收稿日期:2020-01-06
资助项目:贵州省科学技术项目(黔科合基础[2019]1217);贵州师范大学博士科研基金项目(GZNUD[2017]11 号)
第一作者:王兴富(1990—),男,贵州榕江人,在读博士研究生,主要从事喀斯特环境演变与生态建设研究。E-mail:754957282@qq.com
通信作者:黄先飞(1983—),男,贵州遵义人,博士,副研究员,主要从事环境科学研究。E-mail:hxfswjs@gznu.edu.cn

types. The soil organic carbon move along the evolution chain of Karst rocky desertification process, and the change of Small environment and Lithology in different karst landforms are play an important role in the spatial rebuild of soil organic carbon. The ecology environment of karst mountainous area is complex. If we want to get a more sensitive method to estimate the soil organic carbon in different karst landforms, further studies concerning soil organic carbon among different karst landforms were required.

Keywords: different karst landforms; rocky desertification; soil bulk density; small environment; lithology; soil organic carbon; evolving mechanism

土壤是人类生活生产的基础,是环境及物质能量储存转换的载体,是成土母质在物理、化学及生物等多种因素共同作用下形成的复杂生态综合体^[1]。土壤有机碳是土壤肥力的重要组成部分,既是土壤质量的指示,又是提高农业生产及品质的保障,同时对土壤微环境具有调控作用,影响土壤理化性质的全过程^[2-3]。据统计全球陆地表层 100 cm 土壤有机碳储量达 1 460 Pg^[4-5],分别为大气碳库及植被碳库的 2, 3 倍^[6-7]。由于土壤有机碳库容量巨大,在陆地碳库中扮演着重要的角色,土壤有机碳库发生微小幅度的变化,有可能影响全球 CO₂ 循环系统的改变,从而导致温室气体的失衡,影响全球气候变化^[8]。同时土壤是全球碳循环的“源”与“汇”的重要场所,对维系全球碳平衡有着至关重要的作用,在调节全球碳分布及减少 CO₂ 排放有着不可代替的功能^[9-10]。喀斯特岩溶区的成土母质主要为碳酸盐岩,而碳酸盐岩作为全球碳储量最大的库存,因而喀斯特岩溶区在石漠化过程中土壤有机碳的转变对全球碳循环有着及其重要的影响,所以对喀斯特岩溶区土壤有机碳的相关研究成了国际上的热点领域之一^[11-13]。然而土壤中有机碳并不是固定不变的,而是一个长期输出与输入动态平衡的一个结果^[14]。影响土壤有机碳空间分布的因素较多,而不同区域影响土壤有机碳分布的关键因子又有所不同,喀斯特岩溶区地形复杂多变以致其地表生境在空间分布高度异质^[15]。如石漠化程度、成土母质、土地利用方式及植被等因素的变化,使得不同喀斯特地貌类型地表小生境在空间分布呈现较大差异,而影响土壤有机碳的空间分布特征^[14,16]。目前,有针对喀斯特地区土壤有机碳的相关研究较多的从有机碳含量、密度及储量的角度对土壤有机碳空间分布及其影响因素进行分析。Zhang 等^[13]调查 1980—2015 年贵州后寨河喀斯特盆地 0—20 cm 表土层土壤有机碳密度及储量增长幅度分别为 4.91~5.13 kg/m² 及 368.27×10³~385.09×10³ t,且水田对土壤增碳贡献具有关键作用;黄先飞等^[15-16]评估贵州喀斯特小盆地 0—20 cm 土壤层有机碳平均含量和密度分别为 25.07 g/kg 和 4.27 kg/m²,总储量 5.39×10⁸ kg;若对贵州喀斯特石漠化进行退耕还林实行人工造林种草,推测到 2050 年

0—10,0—20,0—30,0—100 cm 土壤层有机碳将分别增加 1.99×10¹³,3.77×10¹³,4.45×10¹³,6.29×10¹³ g;张珍明等^[9]指出在 0—100 cm 土层中喀斯特小流域盆地有机碳随着土层深度的增加而逐渐减小,在 0—60 cm 土层中有机碳受人为干扰较为明显,而在 60—100 cm 有机碳含量变化不大;土壤有机碳密度与土壤厚度呈现正向相关性,而与坡度、石粒含量及岩石裸露率则表现为负相关性。

国内外学者^[1-3,7-9,14-16]从不同的角度对土壤有机碳进行了诸多的相关研究,而从不同喀斯特地貌类型地表小生境及岩性的差异对土壤有机碳的影响机制少有报道。因此,本文从不同喀斯特地貌类型的角度出发,分析地表小生境及成土母质岩性与土壤有机碳之间的关系,探讨喀斯特石漠化过程土壤有机碳空间分布演变对小生境及岩性的响应,以期为脆弱的喀斯特岩溶区生态系统环境保护提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

贵州省(103°36′—109°35′E,24°37′—29°13′N),位于云贵高原向四川盆地和湖南丘陵过度的斜坡地带,是中国西南岩溶的核心区域,有着山高、谷深、坡陡及土薄等特征,喀斯特充分发育,微地形地貌复杂,生态环境脆弱。全省陆地海拔相差较大,最低点位于黎平县水口河出省界处为 147.8 m,最高海拔位于赫章县韭菜坪达 2 900.6 m。位于亚热带季风气候带,属典型的亚热带季风湿润气候类型,年平均气温 13~16℃,降水量 1 150~1 250 mm,且雨热同期,水土流失严重而易发生石漠化^[17]。全省土地面积 17.61 万 km²,岩溶面积达 10.84 万 km²,占总土地面积的 61.56%,其中石漠化面积为 3.75 万 km²,占到岩溶地区的 34.59%^[18]。区域内主要有峰丛洼地、高原、河流峡谷及槽谷等喀斯特地貌。成土母质主要有石灰岩、白云岩、砂页岩及泥灰岩等,地表主要分布小生境类型为土面、土石面、石槽、石沟、石盆及石缝等。

1.2 研究设计

以空间代替时间的方法,通过计算岩石暴露面积而形成石漠化过程的时空系统,以此实现探究石漠化演变过程土壤有机碳在地表生境及成土母质岩性更

迭的动态迁移特征。在地势相同或坡度相近且较少受人为扰动的地面上布设样点,根据岩石裸露面积比率,将喀斯特石漠化分为 5 个等级(表 1),同等级样点的地理环境尽可能的相似^[14]。分别从贵州普定、兴义、关岭、荔波及印江县选取对应的喀斯特高原(KG)、峰丛洼地(KF)、峡谷(KX)、原始森林(KY)及槽谷(KC)作为研究区域。系统分层采集土壤样品,将每个采样点土壤剖面从土表按 10 cm 的厚度进行分层取样。首先采集顶部几个土壤层(0—10,10—

20,20—30,30—40 cm),同时根据土壤层的实际厚度,采集成土母质界面土壤层样品。由于喀斯特岩溶区水土流失严重,土壤层普遍较薄,一般最大采集深度不超过 100 cm,对于深度超过 100 cm 土壤层剖面,可视该层土壤为基岩上覆土层。分析不同小生境下土壤有机碳从表土层随土层深度的增加而变化趋势,以及不同地貌类型之间土壤有机碳的空间差异;同时对比不同成土母质岩性界面土壤层有机碳的空间异质性,探讨岩性演替对土壤有机碳变化的响应关系。

表 1 喀斯特岩溶石漠化等级划分指标

划分指标	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级
岩石暴露面积比例/%	$0 \leq X < 20$	$20 \leq X < 40$	$40 \leq X < 60$	$60 \leq X < 80$	$80 \leq X \leq 100$
地面物质组成类型	土质层	土质面为主	土石质	岩石面为主	岩石面

1.3 样品采集与处理

采样时间为 2018 年 6—11 月,根据地表岩石裸露程度以及不同生境的分布特征,在不同喀斯特地貌类型布设 108 个采样点,共采集 432 件顶部几个土壤层样品,分别来自土面、石土面、石槽、石缝、石盆及石沟 6 种地表小生境。根据成土母质不同岩性的空间分布,分别采集石灰岩、白云岩、砂页岩、泥灰岩及第四纪黄黏土地质背景下交界面土壤层样品 143 件(点)。每件土样采集重量约 1 kg,装入密封袋并对其进行编号,同时记录每个样地的地理环境相关信息。采用环刀法自上而下测定各层土壤容重,用样线法测定岩石裸露率。将采集土样带回实验室平铺于洁净 A4 上自然风干,研磨过 2 mm 筛子,计算石粒含量;称 5 g 土壤于恒温干燥箱中 105 ℃烘干至恒重,测定水分含量。研磨过 0.149 mm 筛子,采用重铬酸钾—硫酸氧化法测定土壤有机碳含量^[9,19]。

1.4 计算分析

根据土壤有机碳含量及土壤容重计算土壤有机碳密度及储量^[14-15],其公式为:

$$SBD=(m_2-m_1)/V \tag{1}$$

$$SOCD=\sum_{m=1}^{n+1} C_m \times SBD_m \times H_m \times (1-\theta_m) \times (1-A_r) \div (1-M_m) \tag{2}$$

$$SOC_t=\sum_{m=1}^n C_m \times SBD_m \times H_m \times (1-A_r) \tag{3}$$

式中:SBD 为土壤容重(g/cm³);m₁为环刀的重量(g);m₂为环刀加烘干土壤的重量(g);V 为环刀容积(cm³);SOCD 为土壤有机碳密度(kg/m²);C_m表示第 m 层土壤有机碳含量(g/kg);SBD_m为地 m 层土壤容重;H_m为 m 层土壤厚度(cm);θ_m为 m 层石粒含量(%);A_r为采样点岩石裸露率(%);M_m为 m 层风干后含水率(%);SOC_t为单位面积有机碳储量(kg)。

运用 Origin 8.6、SPSS 18.0 及 Excel 软件对数据

进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 喀斯特石漠化过程与土壤有机碳

石漠化是喀斯特岩溶区土地荒漠化的主要表现形式,贵州喀斯特岩溶山区水热条件充沛,容易发生水土流失,造成土壤养分流失且分布不均匀,从而导致土壤质量下降。通过时空互换法分析石漠化与土壤有机碳的空间演化。从图 1a 可以看出,不同石漠化演替阶段喀斯特生态系统表土层 0—40 cm 土壤有机碳含量为 113.18~163.98 g/kg,并表现出随着石漠化等级增加而逐级递减的规律。对于自然条件下土壤有机碳作为土壤质量的表征条件之一,一般随着土层厚度的增加而增加,同时表层土壤有机质丰富,氮离子对土壤有机碳具有控制的效果。地表环境以土质(1 级)或土质为主(2 级),土壤有机碳含量较高,相对稳定。而随着地表生境结构的变化,岩石裸露率增加,石漠化加重(3~5 级),水土流失加剧土壤组分发生损失,土壤层次发生改变以及物质组分重构,导致土壤有机碳含量出现较大变幅,并且时空分布不均。由图 1b 可知,不同喀斯特石漠化等级土壤有机碳密度空间演变特征为土壤有机碳密度随着石漠化程度以及土层深度的增加而递减。没有发生石漠化(1 级)土壤表层 0—10 cm 有机碳密度达 2.65 kg/m²,而处于深度石漠化(5 级)条件下相同土层有机碳密度为 0.47 kg/m²,仅接近没有发生石漠化条件下的 1/6。

总之,土壤有机碳的空间分布在不同石漠化演替阶段以及不同土层中存在较大差异。从第 2 级后每增加一级土壤有机碳含量明显减少,到第 5 级土壤有机碳含量减少幅度达 30.98%。土壤有机碳随石漠化程度的增加而急剧下降,因此,任何引起水土流失要素的发生都有可能 导致土壤有机碳发生损失。

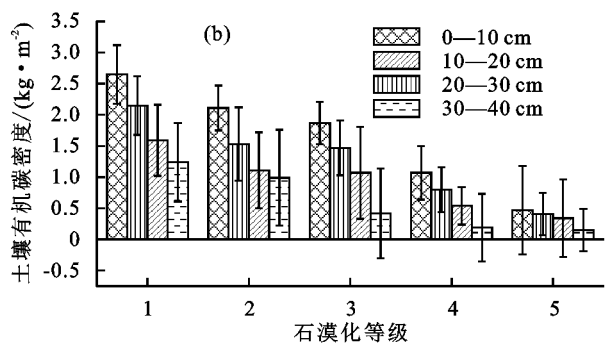
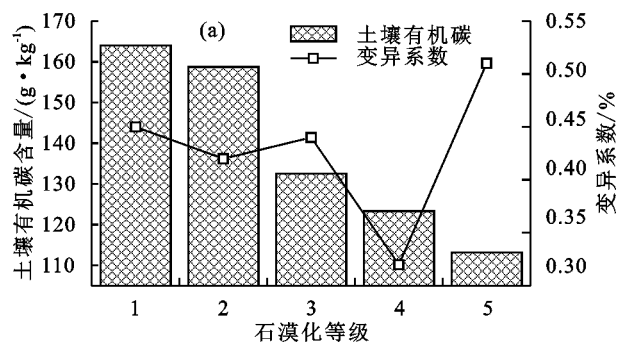
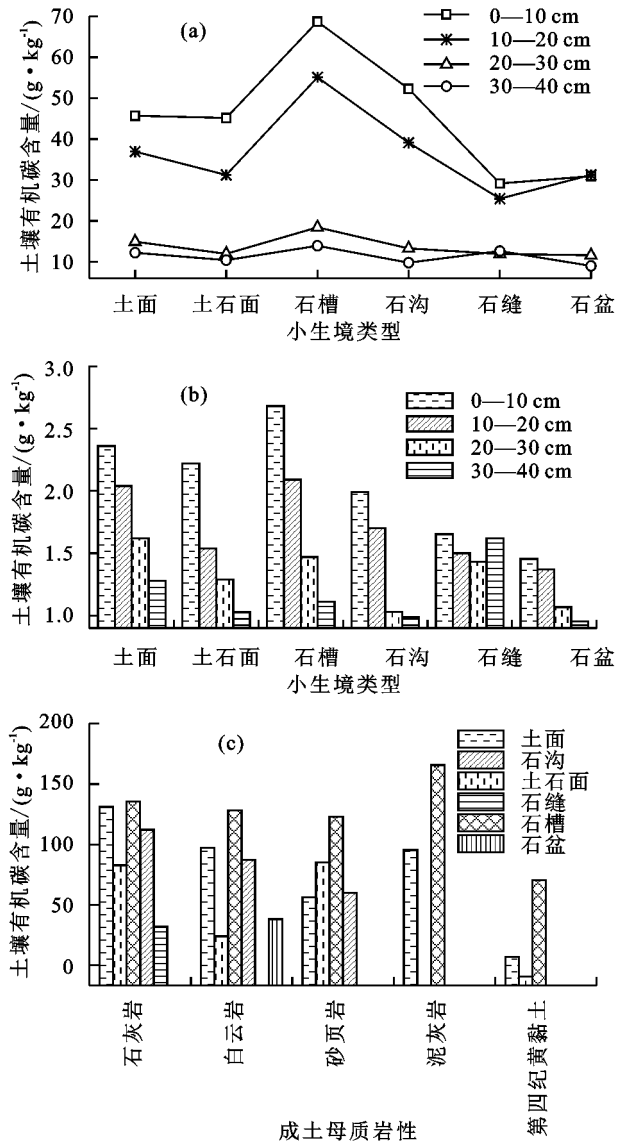


图 1 不同石漠化程度土壤有机碳空间分布特征

2.2 地表小生境的演化与土壤有机碳

对不同小生境顶部土层有机碳进行统计分析。由图 2a 可知,不同小生境下各层土壤有机碳含量总体上随着土层深度的增加而减少,且不同小生境各土层有机碳减幅为 59.1%~79.7%。几种小生境(土面、土石面、石槽、石沟、石缝及石盆)土表组成结构由以土面为主逐渐向以岩石为主演化,其对应的土面岩石裸露率相对增加,石漠化几率相对增大。不同小生境条件下各土壤层次有机碳含量存在较大幅度变动,整体上土壤有机碳随小生境的演化呈现倒“V”形的时空分布特征,特别在表土层(0—10,10—20 cm)尤为明显,而在 20—30,30—40 cm 土层中不同小生境下土壤有机碳含量相差不大。采样点剖面表层小生境由土面逐渐过度到石盆,石漠化程度也相对增大,土壤有机碳含量随着小生境的演化呈先增加然后急剧下降趋势,在石缝和石盆中趋于稳定。其中石槽中表层土壤有机碳含量最高,其次是石沟,石缝含量最低,这可能因为石槽及石沟相对石缝较为宽阔,地形深凹且石漠化程度适中,有利于有机质汇集,从而增加有机碳含量。由此可知,不仅石漠化的演变过程对土壤有机碳的时空分布有着重要的影响意义,同时局部小生境地形地貌条件的优劣也是影响土壤有机碳含量的直接作用因子。由图 2b 可知,不同小生境下不同土层有机碳密度为 0.95~2.68 kg/m²,各土层有机碳密度变化幅度为 13.5%~58.6%,石槽有机碳密度变化最大,石缝最小,这与有机碳含量变化趋势相似。表明石缝中各层次土壤构成组分相似,相对受外界干扰程度较低,土壤内部理化性质较为稳定,有机碳空间分布变化不大。总体上,土壤有机碳空间演化规律随小生境的不同变化较大,其主控因素受限于石漠化进程,但微地形地貌等有利条件的产生可以改变土壤有机碳的空间分布格局。从相同成土母质的角度分析,对比不同地表小生境下 0—40 cm 土壤层有机碳见图 2c。在同一种成土母质上不同地表小生境土壤有机碳含量呈较大差异,且不同岩性上不同小生境土壤有机碳含量又有所不同。成土母质为石灰岩时,不同小生境土壤有机碳含量变化为石槽>土面>石沟>土石面>石缝;白云岩上土壤有机碳含量大小为

石槽>土面>石沟>石盆>土石面;而在砂页岩上则为石槽>土石面>石沟>土面。成土母质为泥灰岩和第四纪黄黏土时对应小生境采集到的土样较少,其石槽土壤有机碳含量均较大程度高于其他小生境类型。总体上,不同成土母质背景石槽土壤有机碳含量最大,此外土面和石沟小生境有机碳含量也相对较高。



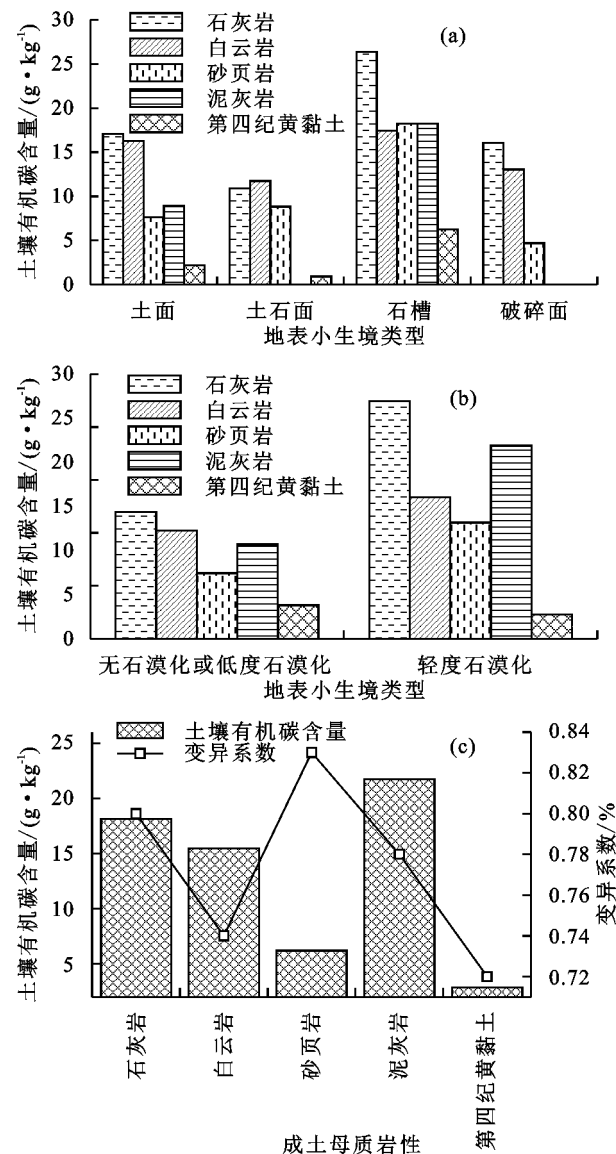
注:(a)为不同小生境土壤有机碳含量的时空分布特征;(b)为不同小生境土壤有机碳密度在垂直方向上的分布特征;(c)为不同成土母质背景下不同地表小生境土壤有机碳含量。

图 2 不同小生境下土壤有机碳分布特征

2.3 成土母质岩性与土壤有机碳

碳酸盐岩是喀斯特岩溶区的主要成土母质,同时也是全球最大的碳库,因此喀斯特岩溶区土壤有机碳的变化对全球碳循环具有指示作用^[11]。贵州喀斯特岩溶区主要分布的碳酸盐岩有石灰岩和白云岩,此外还有砂页岩、泥灰岩以及第四纪黄黏土等不同岩性地质背景。其中石灰岩的主要化学成分是 CaCO_3 , 容易发生溶蚀,是喀斯特岩溶区最主要的岩性分布,是塑造喀斯特岩溶地貌的重要前提。喀斯特地表生态环境复杂多变,在地表生态环境不同演替阶段下不同成土母质界面土壤层有机碳含量不断变化。由于在个别小生境条件下未能采集到所有岩性界面土壤样品,所以个别小生境缺失某个成土母质界面土壤有机碳含量数据。从图 3a 可以看出,地表小生境为土面时不同岩性界面土壤有机碳含量大小依次为石灰岩>白云岩>泥灰岩>砂页岩>第四纪黄黏土,地表小生境为土石面时为白云岩>石灰岩>砂页岩>第四纪黄黏土,在石槽小生境中为石灰岩>砂页岩=泥灰岩>白云岩>第四纪黄黏土,而在地表形态相对破碎的环境中则表现为石灰岩>白云岩>砂页岩。研究区域土壤石漠化程度普遍较低,图 3b 统计了 1,2 级石漠化阶段下不同成土母质界面土壤有机碳含量。在未发生石漠化或低度石漠化阶段下不同成土母质界面土壤有机碳含量依次是石灰岩>白云岩>泥灰岩>砂页岩>第四纪黄黏土;而在轻度石漠化演替阶段除了泥灰岩界面土壤层有机碳含量有明显的增加且大于白云岩,其余成土母质界面土层有机碳含量大小顺序与无石漠化或低度石漠化阶段基本相同。总体而言,不同岩性界面土壤有机碳含量存在较大的差异,其含量从大到小依次为泥灰岩、石灰岩、白云岩、砂页岩及第四纪黄黏土,其对应的土壤有机碳含量值依次为 21.72, 18.13, 15.45, 6.18, 2.82 g/kg, 最大含量值是最小值的近 8 倍(图 3c)。

此外,不同岩性界面土壤层有机碳含量变化程度都达到了高度变异水平^[20],其中砂页岩土壤有机碳含量变化程度最大达到 83%,第四纪黄黏土最低为 72%。为进一步归纳岩性对土壤有机碳的影响,将不同岩性土壤有机碳含量划分为 2 个等级梯度,其中泥灰岩、石灰岩及白云岩土壤有机碳含量为第 1 梯度水平,而砂页岩和第四纪黄黏土土壤机碳含量为第 2 梯度水平,第 1 梯度岩性土壤有机碳平均含量值约为第 2 梯度岩性的 4 倍。泥灰岩土壤有机碳含量最高,介于黏土岩与碳酸盐岩之间的过渡岩性,其主要化学成分为 CaCO_3 和 CO_2 等,可用作土壤肥料。相对而言,石灰岩成土母质背景下土壤有机碳含量普遍高于其他成土母质岩性。



注:(a)为不同小生境下不同成土母质界面土壤有机碳含量;(b)为低度石漠化演替阶段不同成土母质界面土壤有机碳含量;(c)为不同成土母质界面土壤有机碳含量的变异水平。

图 3 不同岩性与土壤有机碳

2.4 土壤容重与土壤有机碳的关系

土壤固体的数量及孔隙度决定土壤容重的大小,受土壤质地、固体颗粒物、有机质含量及耕作管理方式的影响,土壤紧实容重大,土壤疏松容重小。由图 4a 可知,总体上,土壤容重随着土层深度的增加而逐渐增大。其中 0—10 cm 表土层土壤容重随着石漠化程度的增加而降低,而下层土壤(10—20, 20—30, 30—40 cm)在土壤极度退化阶段(5 级)土壤容重出现略微反升趋势。这可能因为石漠化严重表层土壤岩石裸露率大,石粒含量高,土层疏松,而下层土壤相对紧实的原因所致。整体而言,在 0—40 cm 土层中土壤容重累加值为 3.98~4.93 g/cm³,并伴随着石漠化程度的增加而逐渐降低,石漠化等级由 1 级到 5 级土壤容重降幅为 19.3%。当土壤未发生石漠化(1 级)土壤容重变异程度最低仅为 14%,其次是 4 级为 16%,同时中度石漠化程度(2, 3 级)土壤容重变

异程度为中度变异,而在极度石漠化条件下(5 级)土壤容重变异为 41%,达到高度变异水平。相对而言,

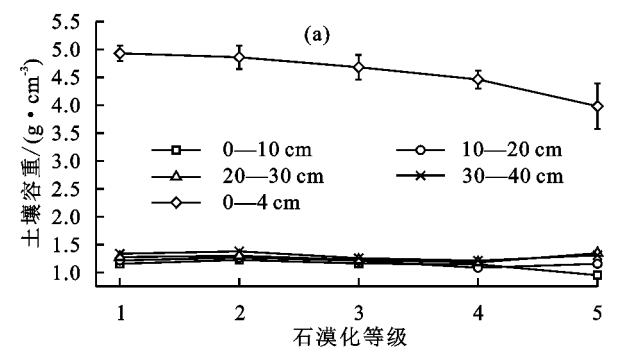


图 4 石漠化与土壤容重、有机碳与土壤容重的关系

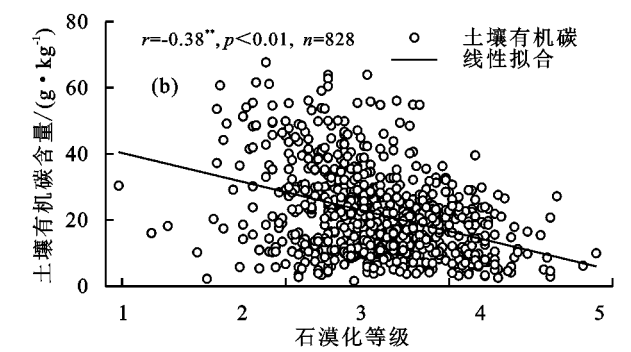
不同石漠化等级下土壤容重变化差异较大,而土壤容重与土壤有机碳含量的相关性见图 4b。由于测定土壤容重环刀高度为 5 cm,需要分 2 次采集 10 cm 土层,所以共采集到 828 个分析数据。通过各层次土壤有机碳含量与土壤容重值的线性拟合分析得出,土壤容重与有机碳含量呈负显著相关性($r=-0.38^{**}$, $p<0.05$, $n=828$)。同时对不同石漠化等级下土壤容重与土壤有机碳含量进行 Pearson 相关性分析得出,未发生石漠化或低度石漠化(1 级)及相对中低度石漠化(2,3 级)的土壤容重与土壤有机碳含量在 0.01 水平下显著相关,其相关系数 r 分别为 0.52,0.42,0.53;而在重度石漠化下(4,5 级)土壤容重与土壤有机碳含量无显著相关性。表明土壤容重对土壤有机碳含量存在负向驱动的作用,土壤容重越高,土壤有机碳含量反而降低。由于土壤容重受土壤质地、有机质含量及耕作管理等因素的影响,同时能指示土壤的熟化程度,土壤容重越高土壤熟化程度反而较低,进而推导土壤有机碳与土壤熟化程度之间的关系及影响地表小生境与土壤有机碳的关系。

3 讨论

3.1 不同喀斯特地貌类型土壤有机碳储量空间迁移与分布格局的重构性

贵州喀斯特地形地貌复杂,岩石裸露率高以及土

石漠化程度越高岩石暴露率越大,土壤相对更加疏松,土壤容重趋于下降。



层瘦薄贫瘠,导致不同喀斯特地貌下植被覆盖、局部小生境及土壤理化性质表现出高度的空间异质性^[21-23]。因此,从不同喀斯特地貌类型的角度讨论地势相同或坡度相近的土地石漠化过程、小生境及成土母质岩性的演化对土壤有机碳储量在空间分布上的重塑特征。

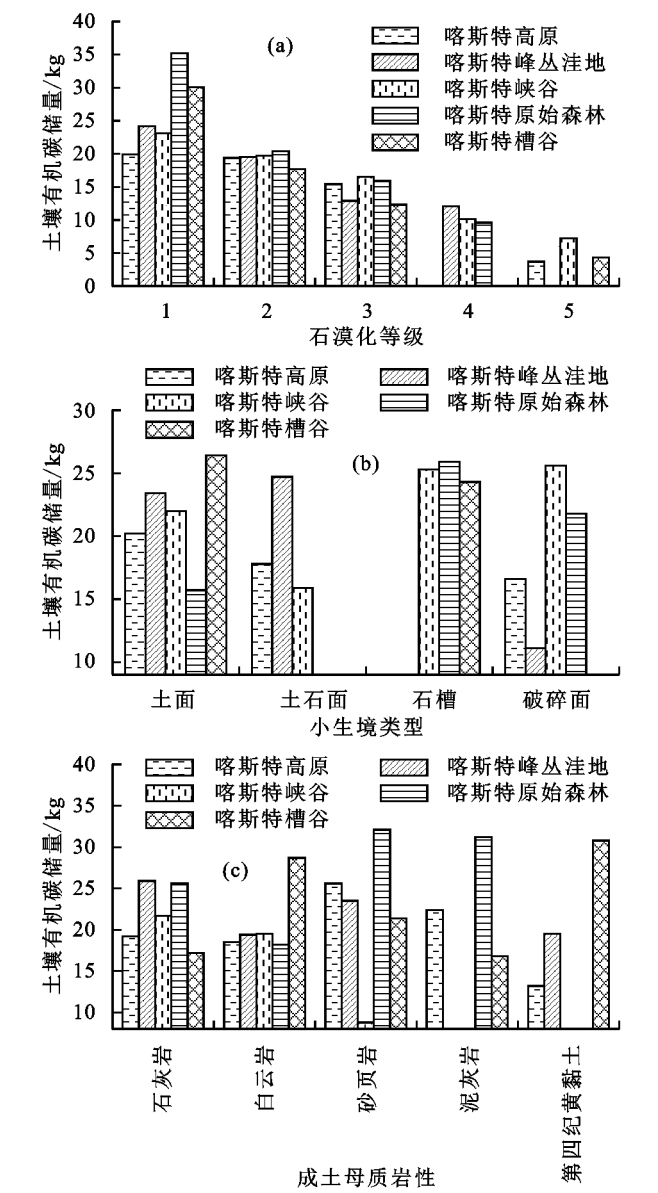
由表 2 可知,KG 及 KF 平均石漠化程度为 1 级,而 KX、KY 及 KC 平均石漠化为 2 级水平。不同喀斯特地貌类型下顶部 2 个土层(0—20,0—40 cm)中有机碳储量大小为 $KC>KY>KF>KX>KG$,并且其储量变化差异均达到高度变异程度。结合石漠化不同演替阶段,土壤有机碳储量并没有直接表现出随着石漠化程度的增加而降低的趋势,在轻低度石漠化阶段 1 级石漠化程度的 KG 与 KF 顶部,土壤层有机碳储量低于 2 级石漠化的 KX、KY 与 KC。表明轻低度石漠化演替阶段对不同喀斯特地貌类型土壤有机碳储量的影响不大。这是因为在轻低度石漠化演替阶段,不同喀斯特地貌环境主要以土面或土石面为主,地表小生境具有较高的相似度;同时 KC 与 KY 表土层有机碳储量相比其他地貌类型较高,这是由于 KY 地表富集有丰富的有机质且受人为干扰相对较少,而 KC 则是长期施用含氮化肥的原因所致^[24-25]。

表 2 不同喀斯特地貌类型土壤有机碳储量统计

地貌类型	石漠化等级	样本数	土层深度/cm	最大值/kg	最小值/kg	平均值/kg	变异系数/%
喀斯特高原	1	48	0—20	32.7	1.7	16.7	0.39
			0—40	35.1	1.7	19.3	0.38
喀斯特峰丛洼地	1	19	0—20	39.0	5.3	19.4	0.43
			0—40	47.9	5.9	22.2	0.44
喀斯特峡谷	2	16	0—20	33.6	6.2	18.5	0.48
			0—40	42.7	6.8	20.2	0.49
喀斯特原始森林	2	13	0—20	55.2	5.4	21.7	0.53
			0—40	55.2	5.4	24.0	0.51
喀斯特槽谷	2	12	0—20	51.0	1.4	22.7	0.54
			0—40	53.3	1.4	25.1	0.53

由图 5a 可知,在同一石漠化等级下不同喀斯特地貌类型土壤有机碳储量也存在一定的差异,但这种差异主要体现在无石漠化或轻度石漠化阶段不同喀斯特地貌类型之间。在 1 级石漠化程度下不同喀斯特地貌类型土壤有机碳储量大小依次为 $KY > KC > KF > KX > KG$,而随着石漠化的加重土壤有机碳储量逐渐减少,但在同一石漠化等级下不同喀斯特地貌之间土壤有机碳储量相差不大。这表明土壤有机碳储量在石漠化演变链上存在由重度石漠化向轻度石漠化动态迁移的趋势,同时不同喀斯特地貌的局部环境及地理特征影响石漠化过程中土壤有机碳储量空间分布的重塑,使得在不同石漠化演替阶段不同喀斯特地貌类型下土壤有机碳储量空间分布存在差异。石漠化影响地表生境的空间结构,轻度石漠化地表以土面为主,随着石漠化程度的增加地表生境变得相对破碎复杂,将石缝、石沟及石盆 3 种微形态归纳为破碎面。由图 5b 可知,不同小生境条件下土壤有机碳储量空间分布并未表现出明显的空间分布规律,除了 KY、KX 及 KC 地貌下石槽中的土壤有机碳储量分布较为稳定外,其他不同喀斯特地貌类型在不同的地表环境中土壤有机碳储量存在较大差异。这是因为在石槽小生境中土层相对较厚且形态凹陷,有利于上覆植被有机物质的汇集,因而其土壤环境及理化性质较为稳定,使其环境有别于其他形态下的小生境特征,这为有机碳的储存提供了良好的前提条件。地表小生境由土面向破碎面演化过程,其石漠化也在一定程度上发生加重的趋势,这也是其土壤理化性质空间异质性较高的原因所在。而成土母质岩性的演变与不同喀斯特地貌类型土壤有机碳储量变化见图 5c。石灰岩背景下 KF 与 KY 土壤有机碳储量相对较高,其余依次为 $KX > KG > KC$;而在基岩为白云岩土壤有机碳储量空间分布表现为 KC 远高于其他地貌类型,剩余地貌类型土壤有机碳储量差异较小;以砂页岩为成土母质时土壤有机碳储量在 KY 中最大,而在 KX 中最小,其余地貌依次为 $KG > KF > KC$ 。成土母质为泥灰岩的界面土壤层样品主要采集自 KG、KY 和 KC,土壤有机碳储量在 3 种地貌类型中呈梯度下降趋势,其中 KY 最大,KC 最小。而以第四纪黄黏土为母质的土壤有机碳储量,其土样采集于 KG、KF 和 KC,其中 KC 中有机碳储量最大,其次是 KF,最小为 KG。从同一岩性为背景的角度来看,不同喀斯特地貌类型下土壤有机碳储量亦并未表现出十分明显的分异规律。但在整体上,结合表 2 中不同喀斯特地貌类型各层次土壤有机碳空间分布特征可以发现,KY 及 KC 土壤有机碳储量与其他地貌类型比较相对较高。这体现出 KY 与 KC 对有机碳储存的优势,首先

KY 上覆植被种类丰富,大量有机物质在微生物的分解作用下进入表土层^[15],而且 KY 位于荔波县,属于自然保护区,受人为活动影响较少,有利于土壤有机碳的储存^[26];其次,KC 地貌位于印江县,是主要的粮食种植大坝,长期大量使用含氮化肥,导致土壤中 Ca^{2+} 及 N 含量相对较高,而土壤中 Ca^{2+} 及 N 的含量是控制有机碳分布的主要因素,土壤有机碳含量随其浓度的增加而逐渐增加^[27]。而 KX 土壤有机碳储量相对较低,主要因为其受“汛期—枯水期”的自然涨落以及人工的干扰,形成快速更迭的局部生态系统,部分滞留有机物未被微生物分解进入土壤中就被洪水位上升冲刷带走,从而土壤有机碳储量相对较低^[28]。



注:(a)为土壤有机碳储量在石漠化过程中的迁移;(b)为土壤有机碳储量在小生境演化链上的重塑性;(c)为土壤有机碳储量在岩性主导下的空间分布格局。

图 5 不同喀斯特地貌类型下土壤有机碳储量的空间分布特征

综上所述,喀斯特石漠化不同演替阶段在一定程度上体现地表小生境的演变,石漠化程度低地表以土

面或石土面为主,随着石漠化程度的增加,岩石裸露率比率逐渐升高使得地表小生境变得相对破碎。由此可以推测出不同地貌类型随着石漠化程度的增加土壤有机碳逐渐降低,但当地表小生境为石槽时则有利于土壤有机碳汇集,土壤有机碳相对较高且稳定。如 KG 土壤有机碳在不同小生境条件下演变机制为土面>土石面>破碎面;KX 石槽分布较多,其有机碳演替机制则表现为石槽>破碎面>土面>土石面;而 KC 土层相对较厚,作为农耕区受人工施肥影响,其小生境为土面的有机碳储量大于石槽。而不同岩性差异对不同喀斯特地貌有机碳影响机制可大致推测为 KG(砂页岩>泥灰岩>石灰岩>白云岩>第四纪黄黏土),KF(石灰岩>砂页岩>泥灰岩>白云岩>第四纪黄黏土),KX(石灰岩>白云岩>砂页岩),KY(砂页岩>泥灰岩>石灰岩>白云岩),KC(第四纪黄黏土>白云岩>砂页岩>石灰岩>泥灰岩)。岩性的演替对 KC 土壤有机碳的影响机制很大程度上不同于其他地貌类型。由此可知,人为干扰是 KC 土壤有机碳空间分布的主控因素。

3.2 小生境与岩性对石漠化过程土壤有机碳演化规律可靠性的探讨

根据不同喀斯特地貌类型石漠化程度,在相同石漠化等级下同一土层(0—40 cm),KG 与 KF 土壤有机碳储量略高于闫俊华等^[14]对贵州喀斯特岩溶区 1 级石漠化下土壤有机碳储量的评估值(16.91 kg),而在 2 级石漠化程度下本研究不同喀斯特地貌类型土壤有机碳储量约为其研究结果的 2 倍。主要原因可能在于闫俊华等^[14]有针对性地对不同石漠化等级进行样点布设、分级取样并且每个等级设置 3 个样地,而本研究根据地表生境的不同分别在不同的喀斯特地貌设置 108 个采样点共采集 575 件土样。同时,本研究较低程度的石漠化样点主要来自有机质丰富且受人为干扰较少的 KY 或者土层较厚适合耕作的 KC,2 种地貌类型具有天然或人为条件因素有利于有机碳储存,所以在较低石漠化程度下本研究土壤有机碳储量相对较高。而在高度石漠化条件下,土壤有机碳在不同地貌类型中未表现出显著的分异规律,这可能因为高度石漠化下地表生境容易发生变化,土壤理化性质分布特征趋于无序性,从而导致有机碳空间分布的高度异质特征,但总体上土壤有机碳呈现出随石漠化程度的增加而减少的趋势^[9,14-16]。

土壤有机碳的空间分布不仅对其成土母质具有延续的特征,而且还受到土地利用、植被类型、坡度、坡向、海拔及石粒含量等环境因素的综合影响^[15,28]。由表 2 可知,不同喀斯特地貌类型表层土壤有机碳储量变化较大,随着土层增厚有机碳变异程度相对减小,上层土壤地面生境复杂多变,土壤理化性质空间

异质性较高,导致表土层有机碳相对于下层土壤变化较大。这表明表土层环境的变化对有机碳的空间分布具有一定的影响作用,随着土层深度的增加这种影响逐渐减小,由此可知,喀斯特岩溶地貌在石漠化过程中地表生境的递变对表层土壤有机碳的空间重塑具有指示意义。而随着土层深度的增加,地表形态及环境对有机碳的干扰程度逐渐降低^[29],此时土壤有机碳的空间分布格局逐渐受到成土母质岩性特征的影响,但这种效果相对较弱,因为土壤有机碳还可能因为土壤厚度差异导致岩石暴露程度而不同。总体而言,喀斯特岩溶石漠化过程中地表小生境及成土母质在不同的演替阶段与土壤有机碳的变化特征,石漠化演替是不同喀斯特地貌土壤有机碳重构空间分布的第 1 主导因素,地表小生境次之,最后是成土母质岩性。综上所述,土壤有机碳的空间分布特征受多种环境因素的共同影响,并且土壤中的有机碳是一个动态平衡的过程,不同因素对土壤有机碳的协同作用是复杂的。目前,有许多关于土壤有机碳的空间分布及影响因素的研究^[9-10,28],但从不同喀斯特地貌类型的角度探讨不同环境因子的演变对有机碳空间分布的影响较少。由于喀斯特地貌复杂,生态系统的稳定性相对脆弱,地表环境在空间分布上高度异质,因此要对喀斯特岩溶地貌土壤有机碳进行较为准确的评估,存在比其他地貌类型更为复杂的因素^[10]。如果要获得对喀斯特岩溶区土壤有机碳更精确的评价,仍需更进一步的研究。

4 结论

(1)喀斯特石漠化过程中 0—40 cm 土层有机碳含量为 113.18~163.98 g/kg,并且土壤有机碳含量随石漠化程度的增加而逐渐降低。在未发生石漠化或低度石漠化条件下土壤有机碳含量变化不大,在中高度石漠化条件下土壤有机碳含量急剧减小。

(2)不同小生境表土层(0—20 cm)有机碳含量变化较大,均达到高度变异水平。并且不同小生境类型表土层有机碳含量沿石漠化演变链迁移呈现倒“V”形的时空分布特征,石槽局部生境条件下有利于土壤有机碳的存储,其含量最高。而下层土壤受地表环境影响较小,有机碳含量变化不大,相对稳定。

(3)成土母质界面土壤有机碳含量具有继承母岩的空间分布特征,其中泥灰岩土壤有机碳含量最高达 21.72 g/kg,第四纪黄黏土最低,仅为 2.82 g/kg,以石灰岩为背景的土壤有机碳含量高于其他成土母质岩性相对普遍。

(4)土壤有机碳含量、密度及储量随石漠化程度的增加而降低,地表小生境的变化对表土层有机碳重塑空间分布具有明显的指示作用,下层土壤有机碳的空间分布相对受成土母质岩性的影响,但这种控制效果有限。

(5)土壤有机碳是一个动态的过程,受多种因素共同协作影响,而喀斯特地貌复杂且生态脆弱多变。因此,要更加精确地评价喀斯特地区土壤有机碳,仍需进一步从不同喀斯特地貌类型的角度研究不同环境因子对土壤有机碳的作用机制。

参考文献:

- [1] Eleanor H, Garry R W, Silvia F B, et al. Stability and storage of soil organic carbon in a heavy-textured karst soil from south-eastern Australia [J]. *Soil Research*, 2014, 52(5): 47-51.
- [2] Singh S K, Singh A K, Sharma B K, et al. Carbon stock and organic carbon dynamics in soils of rajasthan, india[J]. *Journal of Arid Environments*, 2007, 68(3): 408-421.
- [3] Yan J H, Zhou G Y, Zhang D Q, et al. Chang of water content, organic matter and exchangeable cation in soil along with a forest successional gradient in southern China[J]. *Pedosphere*, 2007, 17(3): 397-405.
- [4] Hansen E M, Christensen B T, Jensen L S, et al. Carbon sequestration in soil beneath long-term *Miscanthus* plantations as determined by ^{13}C abundance[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2004, 26(2): 97-105.
- [5] Scharlemann J P, Tanner E V, Hiederer R, et al. Global soil carbon: Understanding and managing the largest terrestrial carbon pool[J]. *Carbon Management*, 2014, 5(1): 81-91.
- [6] Schwendenmann L, Salmond J A, Weissert L F. Variability of soil organic carbon stocks and soil CO_2 efflux across urban land use and soil cover types[J]. *Geoderma*, 2016, 271: 80-90.
- [7] Akpa I C, Odeh O A, Bishop F A, et al. Total soil organic carbon and carbon sequestration potential in Nigeria[J]. *Geoderma*, 2016, 271: 202-215.
- [8] Taghizadeh-Toosi A, Olesen J E. Modeling soil organic carbon in Danish agricultural soils suggests low potential for future carbon sequestration [J]. *Agricultural Systems*, 2016, 145: 83-89.
- [9] 张珍明,周运超,黄先飞,等.喀斯特小流域土壤有机碳密度空间异质性及影响因素[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(2): 313-324.
- [10] 杨思存,王成宝,霍琳,等.不同耕作措施对甘肃引黄灌区耕地土壤有机碳的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(2): 114-121.
- [11] Yuan D X. Carbon cycle in earth system and its effects on environment and resources [J]. *Quatern Science*, 2001, 21(3): 223-232.
- [12] Zhang Z M, Zhou Y C, Wang S J. Patterns and influencing factors of spatio-temporal variability of soil organic carbon in karst catchment[J]. *International Journal of Global Warming*, 2019, 17(1): 89-104.
- [13] Zhang Z M, Zhou Y C, Wang S J, et al. Change in SOC content in a small karst basin for the past 35 years and its influencing factors[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2018, 64(14): 19-29.
- [14] 闫俊华,周传艳,文安邦,等.贵州喀斯特石漠化过程中的土壤有机碳与容中关系[J]. *热带亚热带植物学报*, 2011, 19(3): 273-278.
- [15] 黄先飞,周运超,张珍明.喀斯特石漠化区不同土地利用方式下土壤有机碳分布特征[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(5): 215-221.
- [16] 黄先飞,周运超,张珍明.土地利用方式下土壤有机碳特征及影响因素:以后寨河喀斯特小流域为例[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(6): 1056-1067.
- [17] 陈起伟,熊康宁,蓝安军.基于“3S”的贵州喀斯特石漠化现状及变化趋势分析[J]. *中国岩溶*, 2007, 26(1): 37-42.
- [18] 袁道先,蒋勇军,沈立成,等.现代岩溶学[M].北京:科学出版社,2016.
- [19] Wang Y G, Li Y, Ye X H, et al. Profile storage of organic/inorganic carbon in soil: From forest to desert [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(8): 1925-1931.
- [20] 尚梦佳,周忠发,王小宇,等.基于支持向量机的喀斯特山区土壤环境质量评价:以贵州北部一茶叶园区为例[J]. *中国岩溶*, 2018, 37(4): 575-583.
- [21] Wang H, Gao J B, Hou W J. Quantitative attribution analysis of soil erosion in different geomorphological types in karst area: Based on the geodetector method [J]. *Journal of Geographical Sciencens*, 2019, 29(2): 271-286.
- [22] 李瑞玲,王世杰,熊康宁,等.贵州省岩溶地区坡度与土地石漠化空间相关分析[J]. *水土保持通报*, 2006, 26(4): 82-86.
- [23] 曾江敏,何丙辉,李天阳,等.喀斯特槽谷区不同林地恢复模式下土壤入渗特征[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(4): 58-64.
- [24] 刘梁美子,占车生,胡实,等.黔桂喀斯特山区植被变化及其地形效应[J]. *地理研究*, 2018, 37(12): 2433-2446.
- [25] 张伟,刘淑娟,叶莹莹,等.典型喀斯特林地土壤养分空间变异的影响因素[J]. *农业工程学报* 2013, 29(1): 93-101.
- [26] Xiao K C, Xu J M, Tang C X, et al. Differences in carbon and nitrogen mineralization in soils of differing initial pH induced by electro kinesis and receiving crop residue amendments[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 67: 70-75.
- [27] 陆银梅,李忠武,聂小东,等.红壤缓坡地径流与土壤可蚀性对土壤有机碳流失的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(19): 135-141.
- [28] 张勇,史学正,赵永存,等.滇黔桂地区土壤有机碳储量与影响因素研究[J]. *环境科学*, 2008, 29(8): 2314-2319.
- [29] Huang X F, Wang S J, Zhou Y C. Soil organic carbon change relating to the prevention and control of rocky desertification in Guizhou Province, SW China[J]. *International Journal of Global Warming*, 2018, 15(3): 315-332.